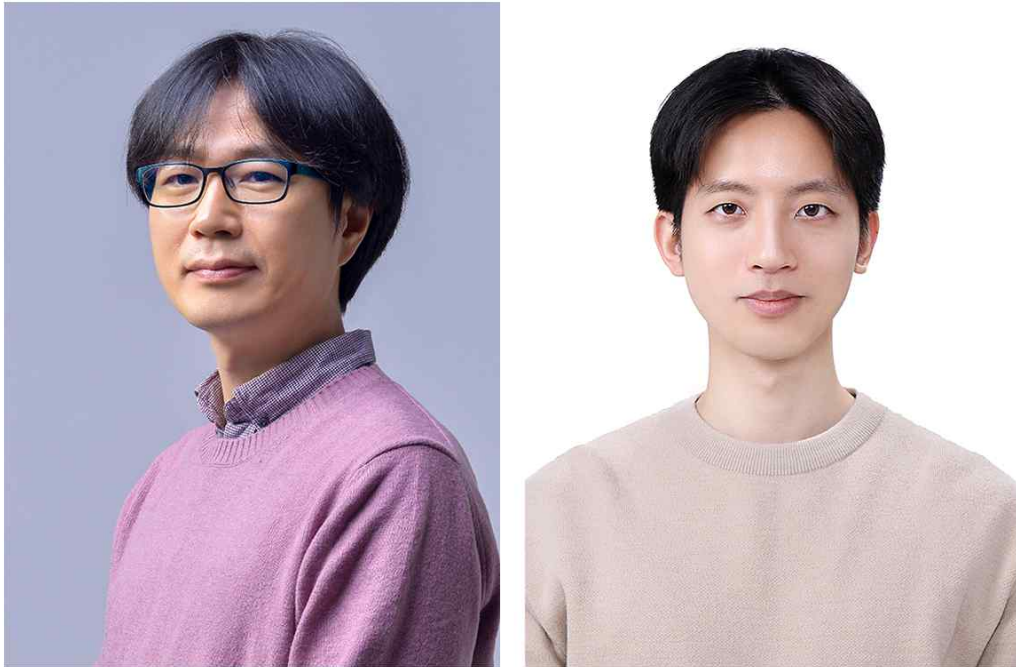


GIST-서강대 공동연구팀, 고압 위상물질의 구조 변화 원리 규명 이차원 바일 반금속의 단계적 구조 전이와 초전도 현상 연결 고리 실험으로 입증

- 물리·광과학과 이종석 교수팀, 고압 환경에서 반데르발스 바일 반금속의 층간·층내 구조 변화를 정량적으로 규명하고, 구조 전이와 초전도 현상 간의 밀접한 연관성 실험적으로 입증
- 단계별 구조 전이 모델 제시해 고압 물성 연구와 스핀트로닉스·양자 컴퓨팅 등 차세대 양자 소재 개발에 중요한 이론적 기반 마련... 국제학술지 《NPG Asia Materials》 게재



▲ (왼쪽부터) 물리·광과학과 이종석 교수, 주휘인 박사

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 물리·광과학과 이종석 교수 연구팀이 서강대학교와 공동으로 '반데르발스 바일 반금속*'으로 알려진 이차원 물질(WTe_2 , MoTe_2)이 고압 환경에서 어떻게 구조와 전자적 성질을 변화시키는지 규명했다고 밝혔다.

이번 연구는 고압 조건에서 위상 물질의 구조 전이와 초전도 현상*이 서로 밀접하게 연결되어 있다는 사실을 실험적으로 입증해 주목받고 있다.

* **반데르발스 바일 반금속(Van der Waals Weyl Semimetal)**: 원자층이 반데르발스 힘으로 느슨하게 결합된 특수한 이차원 금속 물질로, 전자들이 '바일(Weyl) 상태'라는 독특한 양자적 성질을 보인다. 대표적으로 WTe_2 (텅스텐 디텔루라이드)와 MoTe_2 (몰리브덴 디텔루라이드)가 있으며, 이들은 비대칭적인 구조와 강한 스핀-궤도 결합 덕분에 비정상적인 홀 효과, 거대 자기저항, Fermi arc 같은 독특한 현상을 보인다. 특히 MoTe_2 는 온도에 따라 위상 금속과 초전도체 사이를 오갈 수 있어 차세대 전자소자나 양자기술 분야에서 주목받고 있다.

* **초전도 현상(Superconductivity)**: 특정 물질이 매우 낮은 온도(임계온도) 아래에서 전기 저항이 완전히 사라지고, 외부 자기장을 차단하는(마이스너 효과) 성질을 나타내는 물리적 현상이다. 이 상태에서는 전류가 에너지 손실 없이 영구적으로 흐를 수 있으며, 자석이 공중에 뜨는 자기 부상 현상도 관찰된다.

초전도 현상은 전력 손실 없는 송전, 고자기장 장치(MRI), 자기부상열차, 양자컴퓨터 등 첨단 기술에 응용되며, 현재는 상온·상압에서 작동하는 초전도체 개발이 핵심 과제로 주목받고 있다.

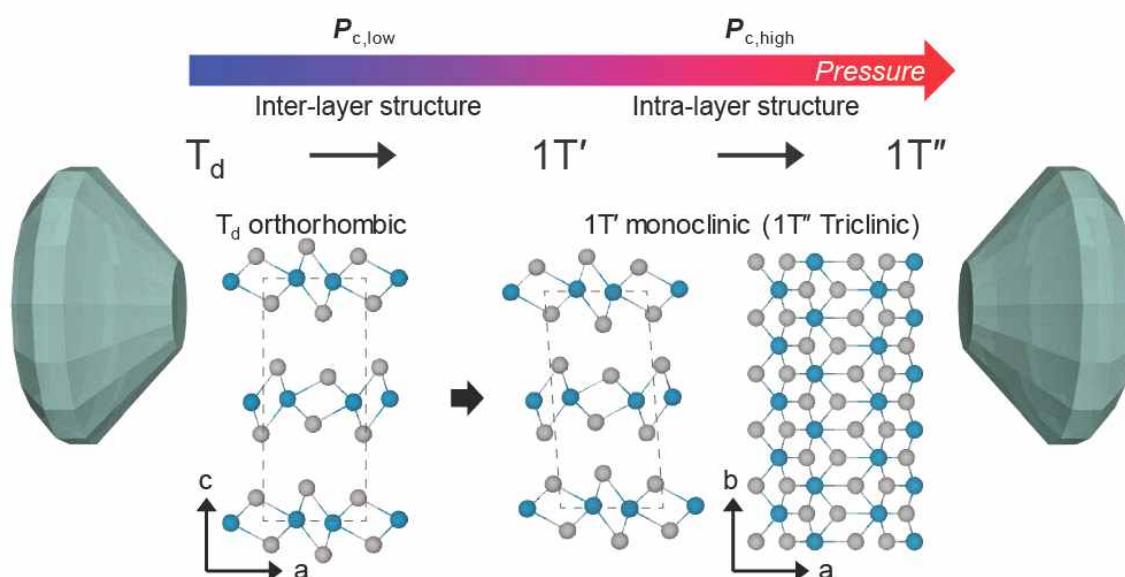
연구팀은 특히, 압력이 가해질 때 반데르발스 물질의 구조가 층과 층 사이(inter-layer), 그리고 층 내부(intra-layer)에서 서로 다르게 변화한다는 사실을 정량적으로 입증하고, 이를 설명할 수 있는 새로운 구조 변화 모델을 제시해 학술적 가치를 높였다.

이 연구 결과는 고압 물질 연구뿐 아니라, 나노·양자 소재 개발의 중요한 이론적 기반으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

반데르발스 물질은 얇은 원자층이 차곡차곡 쌓인 구조로, 각 층 간 결합이 매우 약해 이차원 물질로서의 특성과 강한 방향성(이방성)을 가진다.

여기에 바일 반금속 특성이 더해지면, 전류가 흐를 때 마치 질량이 없는 입자처럼 행동하는 '바일 페르미온(Weyl fermion)'이 나타나 물리학적으로도 매우 흥미로운 대상이 된다.

이번 연구의 핵심은, 반데르발스 바일 반금속(WTe_2 , MoTe_2)의 구조가 압력에 따라 단계적으로 변하며, 이 구조 전이가 전자 상태 변화 및 초전도성 발현과 직접적으로 연결된다는 점을 실험으로 입증한 것이다.



▲ **압력인가에 따른 WTe_2 의 구조 변화 요약.** 다이아몬드 앤빌 셀을 통해 수 기가파스칼의 압력을 인가하면서 결정 구조의 변화가 T_d (정방정계) 구조에서 $1T'$ (단사정계) 구조로, 그리고 $1T''$ (삼사정계) 구조로 순차적으로 나타남.

특히 약 2.5 기가파스칼(GPa)의 압력에서 WTe_2 가 T_d (정방정계) 구조에서 $1T'$ (단사정계) 구조로 바뀌는 구조 전이와 함께, 자기저항이 급격히 줄고 초전도성이 출현하는 현상이 동시에 나타남을 확인했다.

이러한 결과는 **라만 분광***과 **광 펌프-프로브 분광*** 측정을 통해 명확히 관찰되었으며, **구조 전이와 전자적 성질 변화, 초전도성 발현 사이의 직접적인 연관성을 입증**했다.

*** 라만 분광(Raman Spectroscopy):** 분자나 고체 내의 진동, 회전 등 저에너지 모드를 조사하는 비접촉·비파괴 분석 기법이다. 인도 물리학자 C.V. 라만이 발견한 비탄성 산란 현상을 기반으로, 특정 파장의 레이저 빛이 시료와 상호작용할 때 발생하는 파장 변화(라만 산란)를 분석하여 분자 구조, 결합 상태, 결정성, 응력 등의 정보를 얻는다. 별도의 전처리 없이 액체, 고체, 겔 등 다양한 시료 분석이 가능해 반도체, 바이오, 에너지 소재, 예술품 감정 등 다양한 분야에 활용된다.

*** 광 펌프-프로브 분광(Pump-Probe Spectroscopy):** 펨토초(fs) 단위 초고속 레이저 펄스를 이용해 물질의 에너지 상태나 구조 변화를 시간에 따라 실시간 추적하는 동적 분광 기법이다. 먼저 ‘펌프’ 펄스로 시료를 자극한 뒤, 일정 시간 후 ‘프로브’ 펄스로 반응을 측정하여, 전자 전이, 진동 완화, 구조 변화 같은 초고속 현상을 관찰한다. 이 기술은 화학 반응 메커니즘 해명, 반도체 전하 이동, 생체 분자 구조 변화 분석 등에 활용되며, 초고속 분광학과 펨토화학 연구의 핵심 도구로 꼽힌다.

또 하나의 중요한 발견은, **압력 증가에 따라 구조 전이가 두 단계에 걸쳐 일어난다**는 것이다.

낮은 압력에서는 층 사이 구조가 먼저 변하고, 이후 약 10 GPa 이상의 고압 환경에서는 층 내부 원자 배열이 왜곡되며 1T'(단사정계) 구조에서 1T"(삼사정계) 구조로 전이된다.

이러한 고압 전이는 제2차 조화파(SHG) 신호의 급격한 변화, 라만 모드의 소실, 광학 반사도 변화 등을 통해 실험적으로 입증되었으며, 기존에 알려진 전하 농도의 변화 시점과도 정확히 일치해 고압 환경에서 구조 전이의 복잡한 다단계 메커니즘을 밝히는 데 중요한 단서를 제공한다.

이종석 교수는 “이번 연구는 구조 전이, 위상 상태 변화, 초전도성 발현 간의 연관성을 실험적으로 확인하고, 압력에 따른 구조 변화 모델을 제시함으로써 고압 연구의 새로운 이론적 기반을 마련한 데 의미가 있다”며, “이차원 위상물질에서 구조와 전자 특성이 긴밀히 연결되어 있다는 점을 밝혀내면서, 향후 스핀트로닉스·양자 컴퓨팅 소자에서 위상 제어 기술 개발의 중요한 단초가 될 것”이라고 설명했다.

GIST 이종석 교수가 지도하고 주휘인 박사가 수행한 이번 연구에는 서울대학교, 서강대학교, 한국표준과학연구원, 포스텍 등의 연구진이 참여했으며, 과학기술정보통신부·한국연구재단 중견연구자지원사업의 지원을 받았다. 연구 결과는 국제학술지 《NPG 아시아 머티리얼즈(NPG Asia Materials)》에 2025년 4월 30일 온라인 게재됐다.

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : NPG Asia Materials (IF 8.6, 2023년 기준)
- 논문명 : High-pressure phases of van der Waals Weyl semimetal transition metal ditellurides
- 저자 정보 : 주휘인 (제1저자, GIST), 오시원 (제1저자, 서강대학교), 김희정 (공저자, 서울대학교), 이덕현 (공저자, KRISS), 원충재 (공저자, 포항공과대학교), 정수용 (공저자, KRISS), 정현식 (공저자, 서강대학교), 이종석 (교신저자, GIST)